

## 7 – CONCLUSÕES

---

Apresentam-se, neste trabalho, os resultados de uma pesquisa que teve por objetivo avaliar, tecnicamente, a viabilidade da incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. Com base na revisão bibliográfica apresentada pode-se concluir pela atualidade e relevância do tema. Complementarmente, a utilização de ensaios adotados pelo método Superpave para avaliação do ligante asfalto-borracha amplia o campo de validade das conclusões da pesquisa.

Embora os fatores adotados na programação de experimentos laboratoriais e os respectivos níveis não representem todas as variáveis intervenientes, sem dúvida são os mais significativos e, conseqüentemente, serão de grande valia para o estabelecimento de critérios técnicos que viabilizem a utilização de borracha de pneus em larga escala nas obras de pavimentação.

As evidências da pesquisa, baseadas em ensaios de laboratório que simulam o comportamento do material no campo, são de que a mistura asfalto-borracha pode ser benéfica aos pavimentos, melhorando as propriedades de resistência ao acúmulo de deformação permanente (maior rigidez a elevadas temperaturas) e de resistência à formação de trincas por fadiga (maior elasticidade). Além disso, as amostras ensaiadas também apresentaram suficiente resistência à formação de trincas por contração térmica.

A adição de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação representa uma alternativa para a redução do grave problema ambiental causado pela disposição inadequada de pneus usados. Ainda existem obstáculos ao emprego dessa tecnologia, principalmente de origem econômica, pois a trituração dos pneus representa um custo relativamente alto. Mas à medida em que trabalhos de pesquisa apresentarem resultados sobre a viabilidade técnica e a sociedade se conscientizar do elevado custo ambiental da disposição de pneus inservíveis, certamente o uso do ligante asfalto-borracha se disseminará.

Atualmente, no Brasil, a borracha de pneus moída não existe no mercado (em escala comercial). Porém, evidências da experiência americana indicam que o ligante asfalto-borracha tem um custo bem inferior ao dos asfaltos modificados (polímeros). O uso de polímeros nas misturas asfálticas produzidas no Brasil ainda é incipiente, embora sua utilização já venha sendo justificada em diversos projetos, há muito tempo. É provável, portanto, que a expansão do uso de polímeros seja acompanhada pela utilização do ligante asfalto-borracha. Conseqüentemente, empresas como a Relastomer, que forneceu a borracha usada nesta pesquisa, terão a demanda necessária para a produção em escala industrial.

Foi desenvolvida uma programação fatorial de ensaios laboratoriais que permitiu o desenvolvimento de modelos estatísticos para as diferentes propriedades consideradas. Para avaliação do ligante asfalto-borracha foram considerados ensaios tradicionais de caracterização de ligantes asfálticos e também ensaios do método Superpave (reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR, reômetro de viga à flexão – BBR e viscosímetro Brookfield).

Dentre os fatores considerados (teor de borracha, tamanho das partículas de borracha e temperatura de mistura), a análise estatística (ANOVA – Análise de

Variância) dos resultados obtidos confirma a maior influência do teor de borracha, presente (significativo) em todos os dezesseis modelos estatísticos desenvolvidos. O fator temperatura de mistura ou sua interação com outro fator se mostrou significativo em onze dos modelos estatísticos. O fator que menos afetou os resultados dos ensaios realizados foi o tamanho das partículas de borracha, significativo em apenas seis dos dezesseis modelos estatísticos.

Apesar das evidências obtidas com os resultados dos ensaios em laboratório, o desempenho de pavimentos construídos com o ligante asfalto-borracha será melhor estimado após análise de misturas asfálticas em laboratório e, principalmente, a construção de trechos experimentais. Para o desenvolvimento dessas etapas futuras, particularmente a construção de trechos experimentais, serão de grande importância os modelos estatísticos, pois as condições de trabalho nas usinas de asfalto ou mesmo a borracha disponível podem não corresponder à condição ideal. Dessa forma, o conhecimento do comportamento do ligante asfalto-borracha, para diferentes combinações de níveis e fatores, será de grande valia para a definição das condições operacionais visando a produção em larga escala.

Deve-se destacar, também, que os modelos estatísticos representam satisfatoriamente os efeitos dos fatores sobre os ensaios considerados, conforme atestam os elevados coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e, principalmente, a comparação das extrapolações com os resultados obtidos para os teores de 0 e 24% (controle).

Analisando-se particularmente o teor de borracha e seu efeito em todos os ensaios, verifica-se que todos os teores analisados (6, 12, 18 e 24%) atendem aos requisitos de ponto de fulgor (segurança). Os requisitos de ponto de amolecimento e de penetração são atendidos pelos teores de 12, 18 e 24%. A viscosidade aparente a 135°C, importante para a produção de misturas

asfálticas (CAUQ), é atendida pelos teores de 6 e 12%. Os resultados do ensaio DSR, com base nas especificações Superpave, são melhores à medida que o teor de borracha aumenta. E, finalmente, quanto à rigidez no ensaio de fluência à flexão, o melhor teor é 12%.

Considerando-se ainda as dificuldades enfrentadas no preparo das amostras e na realização dos ensaios associadas aos teores de 18 e, principalmente, 24%, pode-se concluir que 12% apresenta-se como o teor mais adequado e como ponto de partida para investigações futuras.

Dentre as dificuldades encontradas no desenvolvimento do trabalho, duas merecem destaque:

- necessidade de aquisição de um misturador e de um recipiente capaz de aquecer o ligante até 190°C: com os recursos disponíveis, foi possível adquirir equipamentos que, se não são o que há de melhor em nível mundial, seguramente atenderam às necessidades do trabalho;
- dependência do laboratório da Petrobrás (CENPES, RJ) para realização dos ensaios Superpave: mesmo com todas as dificuldades associadas ao deslocamento para o Rio de Janeiro (transporte das amostras, custo etc.), a experiência no CENPES foi valiosa em razão da possibilidade de ter o acompanhamento dos técnicos quando do treinamento para a execução dos ensaios e, principalmente, pela disponibilidade, atenção e valiosas sugestões recebidas de seus engenheiros. Apesar disso, deve-se reafirmar a necessidade de que os principais laboratórios de pesquisa brasileiros adquiram os equipamentos exigidos pela Especificação Superpave.

Finalmente, as principais sugestões para trabalhos futuros são:

- análise fatorial completa do ligante asfalto-borracha, incluindo os fatores que não puderam ser analisados neste trabalho (tipo de CAP, tempo de reação, uso de diluente), além da consideração de níveis adicionais para os fatores granulometria da borracha e temperatura de mistura;
- preparo e ensaio de misturas asfálticas com ligante asfalto-borracha, avaliando-se as propriedades como módulo de resiliência, fluência estática, fluência dinâmica, adesividade etc.;
- execução de trechos experimentais e acompanhamento do desempenho sob condições de tráfego e climáticas;
- análise do ligante asfalto-borracha quanto a reciclagem de ligantes asfálticos modificados por borracha moída.